

В.М. СІВАК, кандидат технічних наук

О.Є. ЩОДРО, доктор технічних наук

М.І. ПИЛИПЕЙ, аспірант

Національний університет водного господарства та природокористування,
м.Рівне

ВПЛИВ РОЗТАШУВАННЯ АЕРАТОРІВ НА МАСООБМІН І ГІДРОДИНАМІКУ АЕРОТЕНКІВ

В статті проаналізовано вплив розташування систем аерації на масообмін і гідродинаміку аеротенків. Зниження затрат електроенергії на аерацію, підвищення якості очищеної води та зменшення енергоємності аеротенків очікується.

Ключові слова: аератори, гідродинаміка, масообмін, аеротенк, електроенергія.

В статье проанализировано влияние расположения системы аэрации на массообмен и гидродинамику аэротенков. Снижение затрат электроэнергии на аэрацию, повышение качества очищенной воды и уменьшение энергоемности аэротенков.

Ключевые слова: аэраторы, гидродинамика, массообмен, аэротенк, электроэнергия.

The article analyzes the influence of aeration systems disposition on water exchange and hydrodynamics of aerotanks. The reduction of costs of energy and quality improviny are expectable.

Key words : aerators, hydrodynamics, mass transfer, aeration tank, electric power.

Вступ. Ефективність очищення стічних вод в аеротенках базується на вмілому (грамотному) використанні знань про кінетику, масообмін та гідродинаміку процесів, що відбувається в цих спорудах. Чомусь при розрахунку та проектуванні аеротенків часто забувають про гідродинаміку, а це, на наш погляд, є недостатнім підходом до методики проектування, тому, що інженерне оформлення сучасних процесів біохімічного очищення стічних вод в аеротенках представляє собою комплексну інженерну задачу, яка включає кінетику масообміну та гідродинаміку.

Аерація в аеротенках є самою затратною статтею при очищенні стічних вод, а тому цій проблемі приділяють і продовжують приділяти велику увагу науковці та практики.

Відомо, що ефективність залежить від оптимального вибору типу аераторів. Так, для крупних аеротенків найбільш ефективними виявились

пневматичний, дрібнобульбашковій системі аерації. Вони є найбільш всебічно дослідженими, тому широко використовуються, як в світовій так і вітчизняній практиці. Основною проблемою при використанні цих систем є підвищення ефективності розчинення кисню повітря у воді та коефіцієнт корисної дії (ККД) аерації.

Таким чином оптимальне технологічне-конструктивне рішення щодо розташування системи аерації в умовах повздовжньої рециркуляції мулової суміші представлятиме собою енергозберігаючу проблему. Раціонально її можна розв'язати на базі комплексного розв'язання задач кінетики біохімічної деструкції забруднюючих речовин при збільшенні дози активного мулу в аеротенку та масообміну кисню з урахуванням гідродинамічної структури потоку мулової суміші.

Найбільш широко використовуються аеротенки, в яких аератори розташовані біля однієї із повітряних стінок в один-два ряди.

Така конструкція базується на припущенні, що одностороннє розташування аераторів приводить до обертового руху мулової суміші по спіралі вздовж аеротенку. Передбачалось, що такий характер руху мулової суміші краще за все забезпечить її перемішування і рівномірний розподіл у ній бульбашок повітря.

Однак дослідження ряду авторів виявили суттєві недоліки такої конструкції у порівнянні з розташуванням аераторів по всій площі дна аеротенку.

Метою статті є математичне моделювання та дослідження впливу розташування пневматичних дрібнобульбашкових аераторів по дні аеротенку на масообмін і гідродинаміку біохімічного очищення стічних вод в аеротенках.

Об'єктом дослідження є аеротенки різних типів (змішувачі, витиснювачі дифузійного типу, і т.п.)

Предметом дослідження є вплив розташування пневматичних аераторів та його щільності на дні аеротенків на масообмін і гідродинаміку потоку в ньому.

Актуальність теми підтверджується тим, що багаторічний світовий та вітчизняний досвід експлуатації аеротенків висуває перед дослідниками задачу пошуку шляхів щодо зменшення затрат на очищення стічних вод в аеротенках шляхом зниження витрат повітря та покращенням його використання.

Подача стиснутого повітря є найважливішим фактором, який визначає економічні показники очищення стічних вод аерацією у присутності активного мулу. За даними багатьох вчених затрати електричної енергії на подачу стиснутого повітря складають 20...30% від всіх експлуатаційних затрат по очищенню стічних вод на станціях аерації.

Кисень, що подається в аеротенк з повітрям, використовується лише на 5...10%. Звідси ясно, що шляхи зниження вартості очищення стічних вод в аеротенках лежать, в першу чергу, в пошуку способів підвищення цього відсотку, що одночасно дасть змогу знизити витрати повітря, а отже приведе до зниження витрат електроенергії повітродувними станціями.

Постановка проблеми. Повітря, що подається в аеротенк, виконує дві функції: насичення мулової суміші розчиненим киснем і здійснення інтенсивного перемішування активного мулу із стічною водою, що очищується.

Сучасне повітродувне обладнання дає змогу розташовувати пневматичні аератори при глибинах аеротенків до 12 м, але у практиці зустрічаються пропозиції щодо збільшення їх глибин до 12...15 м. з метою підвищення їх ефективності. Але наукових досліджень щодо масообміну кисню для таких глибин нема; в основному такі дослідження були проведені до глибин 5 м.

Дослідженнями встановлено, що ефективність масообміну кисню залежить від періоду контакту повітряної кожної бульбашки з водою: чим більший цей контакт, тим більша маса кисню перейшла у мулову суміш. Так, в аеротенках глибиною 3м період контакту повітряної бульбашки з муловою сумішшю становить тільки 3...4 с, замість оптимальних 10...12 с, при відповідному зниженні масопередачі кисню. Крім того, ефективність аерації залежить від щільності розташування аераторів на дні аеротенку та її впливу на масопередачу кисню.

Результати досліджень та їх аналіз. Розглядаючи проблему впливу розташування пневматичних аераторів на дні аеротенків в історичному аспекті, можна відмитити наступне. Ще в сорокових роках ХХ століття проф. Н.О. Базякіна [1] на основі експериментальних досліджень, проведених на харківських аеротенках, вказали на значні недоліки системи подачі повітря з однієї сторони аеротенку. Вимірювання інтенсивності аерації та аналіз концентрації розчиненого кисню в різних точках по середині аеротенку виявили низький коефіцієнт масопередачі його над аераторами та уповільнення швидкості окислювальних процесів через недостачу кисню біля протилежної стінки.

Вимірювання інтенсивності аерації в різних точках по ширині аеротенка та визначення концентрації розчиненого кисню в них виявили низький коефіцієнт його абсорбції. При чому над аераторами (фільтросами) має місце також уповільнення швидкості окислювальних процесів через дефіцит кисню біля протилежної від фільтросів сторони. При цьому Н.О. Базякіна вказує на можливість анаеробного біохімічного окислення в точках, що найбільш віддалені від фільтросів по горизонталі.

Зміни величин інтенсивності аерації, швидкості споживання кисню та коефіцієнту його абсорбції над аераторами на початку і в кінці аеротенку представлені у табл. 1 і 2 згідно до роботи [1.10].

В кінці 60-х і на початку 70х років ХХ століття проблемою впливу різних розташувань аераторів на дні аеротенку на гідродинаміку та масообмін кисню займались д.т.н. Орловський З.О. та його учні кандидати техн. наук. Худенко Б.М. та Шпірт Є.О. [2].

В 90-х роках ХХ століття також були опубліковані роботи [3,20;4,15;5,32] щодо впливу розташування аераторів на дні аеротенків на гідродинаміку та масообмін кисню.

Таблиця 1

**Значення величини інтенсивності аерації (в $\text{м}^3/\text{м}^2\cdot\text{год}$)
в різних точках аеротенків**

Місце вимірювання	Інтенсивність аерації в $\text{м}^3/\text{м}^2\cdot\text{год}$		
	Над аераторами	В середині ширини аеротенку	З протилежної сторони від аераторів
На початку аеротенку	9,15	7,45	1,64
В кінці аеротенку	13,55	7,85	4,71

Аналогічно в цих самих місцях аеротенку Н.О. Базякіною досліджувались такі параметри: швидкість споживання кисню та коефіцієнт його абсорбції. Ці дані представлені в табл. 2.

Таблиця 2

**Швидкість споживання кисню (M , в $\text{мг/л}\cdot\text{год}$)
та коефіцієнт його абсорбції при аерації (n , відсоток)**

Місце вимірювання	Над аераторами		В середині ширини аеротенку		З протилежної сторони від аераторів	
	M	n	M	n	M	n
На початку аеротенку	42,0	4,76	33,3	3,20	18,5	9,13
В кінці аеротенку	36,1	3,04	28,4	2,93	19,40	9,08

В останні роки в роботі [6,55] були проаналізовані результати наукових досліджень стосовно впливу розташування аераторів на дні аеротенків на гідродинаміку та масообмін кисню. Наприклад, в табл. 3 [6,55] представлені результати щодо впливу щільності розташування аераторів на величину витрат повітря, що подається в аеротенк.

Таблиця 3

**Вплив щільності розташування аераторів на дні аеротенку на
оптимізовану кількість повітря, що подається в систему аерації**

f/F	0,05	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,75	1,0
K_1	1,34	1,47	1,68	1,89	1,94	2	2,13	2,3
K_2	1	1,1	1,25	1,41	1,44	1,49	1,59	1,72

Примітка: f – площа, яку займає аератор на дні аеротенку; F – площа дна аеротенку; K_1 – коефіцієнт, що відображає вплив f/F на швидкість масопередачі кисню; K_2 – коефіцієнт, що враховує зниження витрат повітря на аерацію.

Із табл. 3 видно, що при 100% укладанні аераторів на дні аеротенку (по всій його ширині) витрати повітря на аерацію мулової суміші можна знизити на 72%. Хоча цей факт і раніше був відомим, але рідко був реалізований на практиці. Чому? Відповідь проста. Не було засобів перемішування мулової

суміші з стічною водою, особливо при збільшенні дози активного мулу. А збільшення останньої дає можливість прискорити кінетику біохімічних процесів в аеротенку. Але при цьому виникають проблеми масообміну кисню та осідання активного мулу на дні аеротенка, який повинен бути у завислому динамічному стані. Таким чином, знову зростає роль гідродинаміки потоку в аеротенку та в аналогічних біоокислювачах (наприклад: циркуляційних окислювальних каналах, біологічних ставках і т.п.).

Аналізуючи статтю [6,55] та наведені в ній факти, можна засвідчити, що енергія горизонтального потоку в аеротенках збільшує ефект масоперенесення при зонованому розташуванні аераторів з однієї сторони коридорі аеротенку. Так, наприклад, рядом робіт (цитуємо по [6,55]) зафіксовано, що в реальних умовах (16 тис. мешканців, глибина води в аеротенку 4,0 м) при швидкості горизонтального потоку 0,21 м/с окислювальна здатність (ОЗ) системи аерації зросла на 17,5%, при збільшенні загальних енергетичних витрат (Е) на 9,8%. Подальше підвищення швидкості води в аеротенку розподілилось наступним чином: 0,25 м/с – ОЗ збільшилась на 33,6%, Е – на 17,3%, а при швидкості 0,32 м/с – збільшення ОЗ відбулося на 49%, Е – на 21,1%.

Важливою проблемою при збільшенні дози активного мулу в аеротенках при різній щільності розташування аераторів на дні цих споруд є забезпечення умов завислого стану пластівців активного мулу. Для вирішення цієї проблеми автори статті пропонують наступну математичну модель, аналогічну тій, що була запропонована для річок В.М. Маккавеевим.

Для опису процесу перемішування активного мулу в аеротенку розглядається рівняння турбулентної дифузії:

$$\frac{\partial s}{\partial t} + u \frac{\partial s}{\partial x} + v \frac{\partial s}{\partial y} + w \frac{\partial s}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D \frac{\partial s}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D \frac{\partial s}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(D \frac{\partial s}{\partial z} \right) - w_0 s. \quad (1)$$

Вважаючи, що $D_z \gg D_x$, $D_z \gg D_y$, з дифузійного рівняння (1) отримано наступне рівняння шляхом його спрощення:

$$\frac{\partial}{\partial z} \left(D_z \frac{\partial s}{\partial z} \right) - V \frac{\partial s}{\partial x} = \frac{\partial s}{\partial t}; \quad (2)$$

де x, y – декартові координати; t – часова координата; $\Delta x, \Delta y, \Delta t$ – кроки рівномірної сітки, яка покриває розрахункову область:

$$\omega_{\Delta x, \Delta z, \Delta t} = \omega_{\Delta x} \times \omega_{\Delta z} \times \omega_{\Delta t},$$

де: $\omega_{\Delta x} = \left\{ i \cdot \Delta X : i = \overline{0, n}; \Delta X = \frac{N}{n} \right\}$, $\omega_{\Delta z} = \left\{ j \cdot \Delta Z : j = \overline{0, m}; \Delta Z = \frac{M}{m} \right\}$,

$\omega_{\Delta t} = \left\{ k \cdot \Delta T : k = \overline{0, l}; \Delta T = \frac{L}{l} \right\}$, i, j, k – відповідні координатні індекси; $D(x, y)$ – коефіцієнт дифузії.

Враховуючи, що дифузійний член в рівнянні (1) може бути представлений наступним чином

$$\frac{\partial}{\partial z} \left(D \frac{\partial s}{\partial z} \right) = D \frac{\partial^2 s}{\partial z^2} + \frac{\partial D}{\partial z} \frac{\partial s}{\partial z}; \quad (3)$$

скінчено-різницевий аналог рівняння (3) приймає вигляд

$$D_{ijk} \frac{S_{i,j-1,k} - 2S_{ijk} + S_{i,j+1,k}}{(\Delta z)^2} + \frac{D_{i,j+1,k} - D_{i,j-1,k}}{2\Delta z} \cdot \frac{(S_{i,j+1,k} - S_{i,j-1,k})}{2\Delta z} - V_{ijk} \frac{S_{i+1,j,k} - S_{i-1,j,k}}{2\Delta x} = \frac{S_{i,j,k+1} - S_{i,j,k-1}}{2\Delta t}; \quad (4)$$

Враховуючи нумерацію і діапазони зміни кожного координатного індексу $i = (\overline{0, n})$, $j = (\overline{0, m})$, $k = (\overline{0, 1})$, покриємо розрахункову область рівномірною сіткою $\omega_{\Delta x, \Delta z, \Delta t}$.

Для прикладу взято $n = m = k = 4$, номери вузлів показано на рис. 1 у прямокутниках.

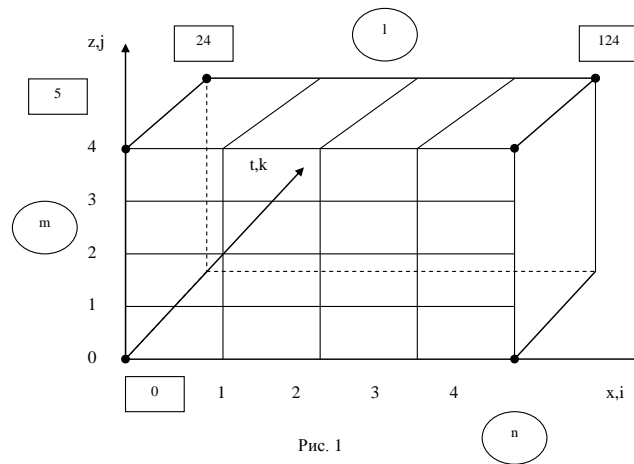


Рис. 1. Схема розрахункової області і сітка

На основі рівняння (4) явним методом шукається його розв'язування при заданні початкових і граничних умов наступним чином:

при $t = 0$ задано розподіл концентрації у всій розрахунковій області

$$S_0 = S(x, z, 0); \quad (5)$$

$$\text{на верхній поверхні при } z = H \quad S = S^*; \quad (6)$$

$$\text{на дні при } z = 0 \quad S = 0; \quad \frac{\partial S}{\partial z} = 0; \quad (7)$$

$$\text{на вхідній вертикалі } (x = 0), \quad S = S_*(z). \quad (8)$$

Вважається заданим і поле швидкостей, яке може бути пораховано за методикою [8,1-5].

Екологічний стан річок залежить від якості води, яка випускається через каналізаційні випуски. Саме для покращення якості їх випусків застосовуються аеротенки, в яких штучно інтенсифікується масообмін та здійснюється оксигенація. Їх розрахунок може вестися за описаною схемою. На процес біологічної очистки впливає багато показників: концентрації органічних забруднень, кисню, активного мулу; температура, величина рН (кислотні властивості середовища); перемішування; токсичні домішки (солі

важких металів, хлориди); біогенні елементи (азот, фосфор). З написаного вище стає зрозуміло, що процес біологічної очистки в аеротенках є дуже складним і не передбачуваним, але на основі проведених розрахунків можна оцінити інтенсивність основних процесів переносу.

Самі аеротенки є досить громіздкими спорудами. Якщо правильно підібрати його режим, можна створити умови, за яких можливо зменшити його розміри в плані і це не вплине на ефективність його роботи. Перенесення кисню має особливе значення для розвитку мікроорганізмів, і кисень частіше є лімітуючим фактором, ніж інші субстрати. Це пояснюється його малою розчинністю і відносно високою швидкістю споживання при аеробному рості мікроорганізмів [1,10]. Крім того, молярне споживання кисню за сумарними реакціями є значно більшим, ніж субстратів.

Аналогічним чином можуть бути розглянуті процеси і при організації подачі стиснутого повітря в аеротенк. Відомо, що штучна подача стиснутого повітря в аеротенк здійснюється для забезпечення киснем окислювальних процесів мінералізації органічних забруднень, що містяться в стічних водах, а також для створення інтенсивного змішування (барботажу) стічної води з активним мулом і повітряними бульбашками. Цим визначається найважливіша роль повітря поряд з іншими факторами (склад стічних вод, доза і якість активного мулу, тощо).

На рис.2 показано результати розрахунків за складеною програмою.

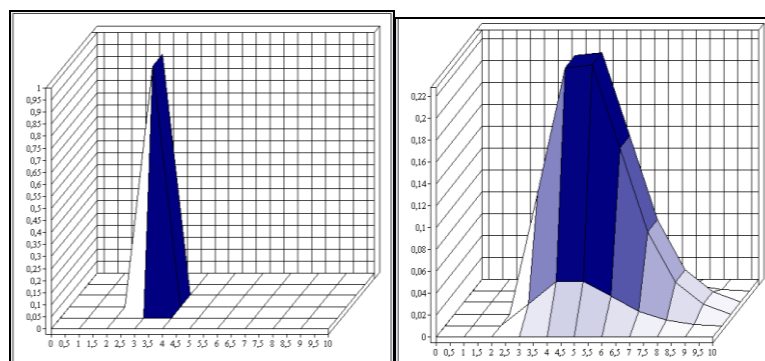


Рис. 2. Розподіл концентрацій у потоці у моменти часу $t = 0$ с та $t = 1$ с за результатами розрахунків

Розподіл забруднень в аеротенку дає можливість оцінити ефективність перемішування активного мулу зі стічною водою.

Ідеї Тейлора-Шмідта, які були використані В.М. Маккавеевим для річкових наносів, можуть бути застосовані для опису руху мулової суміші у водному потоці. Згідно його теорії, перенесення частинок з гідравлічною крупністю (швидкістю осідання частинок в стоячій воді) w_0 в трьох напрямках визначається рівностями:

$$q_{sx} = -\varepsilon \cdot \frac{\partial s}{\partial x}; \quad q_{sy} = -\varepsilon \cdot \frac{\partial s}{\partial y}; \quad q_{sz} = -\varepsilon \cdot \frac{\partial s}{\partial z} + w_0 s, \quad (9)$$

де $\varepsilon = \frac{A}{\rho}$ – коефіцієнт турбулентної дифузії; w_0 – швидкість осідання інертних часток у потоці.

Запропонована Маккавеевим теорія дозволяє отримати розрахункові формули профілю мутності, транспортуючої здатності річкового потоку а так само і для активного мулу в аеротенках. Виведена ним формула мутності при умові $A=const$ тривалий час застосовувалась в багатьох практичних розрахунках. Ця формула записується у вигляді

$$s = s_H e^{-\frac{w_0 H}{\varepsilon} \left(1 - \frac{z}{H}\right)}, \quad (10)$$

де s_H – концентрація наносів поблизу дна; H – глибина потоку.

Висновки

Аналіз досліджень зарубіжних і вітчизняних вчених свідчить про те, що щільність розташування аераторів на дні аеротенку впливає на кінетику, масообмін та гідродинаміку процесу очищення стічних вод.

Проблема конструктивно-технологічних рішень систем пневматичної аерації не достатньо досліджена і є актуальною.

Методичний підхід стосовно визначення характеристик масообміну в аеротенках та їх гідродинаміки, наведений в даній роботі, дозволяє покращити методику проектування аеротенків та значно підвищити їх енергомісткість.

Список літератури

1. *Н.А. Базякина.* Аэротенк-смеситель для очистки промышленных вод с высокой концентрацией органических веществ. М.: Изд.во ВОДГЕО, 1948. 70 с.
2. *Худенко Б.М., Шпирт Е.А.* Аераторы для очистки сточных вод. М. Стройиздат, 1973. 112 с.
3. *S.Rissler* // Effect of horijntal flow on aeration. Scienfic smpeller, №3 1995
4. *C. Ramel, W Scriabin* // L'amelijration du transfert d'oxygete pan circulation des boues actives dans les station d'epuration. L'eau, L'industrie les nuisances December, 1992.
5. *Gillot's Heduit A.* // Effect air flow rate on oxygen transfer in an oxidation ditch equipped with fine bubble diffusens and slow speed mixens. Water resear v 34, № 5. 2000.
6. *В.И. Баженов.* Инжерное офромление крупных аэротенков по экономическому принципу // Водоочистка. № 4. 2008. С.49-59.
7. *Щодро А Е., Шинкарук Л.А. Барановський С.В.* Зксдериментальные и теоретические исследсвания кинематики потока и местных деформаций дна в зоне мостових переходов // Міжвідомчий науково-технічний збірник НТУ Автомобільні дороги і дорожнє будівництва. Вип 63. К., 2001. С.266-270.

8. Щодро О.Є., Ходневич Я.В. Розрахунки просторових течій в зоні активного вимиву ґрунту при місцевому розмиві // Збірник наукових праць викладачів та студентів факультету кібернетики. Рівне, Міжнародний економіко-гуманітарний університет ім. акад. С. Дем'янчука, 2006. С 28-34.

Надійшло до редакції 23.11.2016

УДК 628.16

Н.В. СОРОКИНА, кандидат технических наук,
Л.А. ФЕСИК, кандидат технических наук,
Одесская государственная академия строительства и архитектуры

ПУТИ УТИЛИЗАЦИИ ОСАДКОВ ВОДОПРОВОДНЫХ ОЧИСТНЫХ СТАНЦИЙ

Розглянуто проблеми, які пов'язані з накопиченням осадів на станціях водопідготовки, і шляхи утилізації осадів залежно від їх складу і властивостей.

Ключові слова: осади станцій водопідготовки, утилізація, безвідходні технології, добрива, ґрунти, будівельні матеріали, регенерація коагулянту.

Рассмотрены проблемы, связанные с накоплением осадков на станциях водоподготовки, и пути утилизации осадков в зависимости от их состава и свойств.

Ключевые слова: осадки станций водоподготовки, утилизация, безотходные технологии, удобрения, почвогрунты, строительные материалы, регенерация коагулянта.

Problems, related to the accumulation of sediments on the stations of natural water treatment, and the ways of utilization of sediments depending on their composition and properties, are considered.

Key words: sediments of the stations of natural water treatment, utilization, nonwaste technologies, fertilizers, soils, building materials, the regeneration of coagulant.

Бессточные схемы работы очистных сооружений водопроводных станций предотвращают сброс всех «хвостовых» вод и осадков в окружающую среду и решают задачу создания безотходных технологий [3].

Одной из проблем является то, что на большинстве станциях водоподготовки Украины, не предусмотрены сооружения для обработки водопроводных осадков и промывных вод [4].